

# 工作波段覆盖近紫外到近红外波的 消偏振分色片的设计与研制

庄秋慧<sup>1,2</sup> 刘国军<sup>1\*</sup> 付秀华<sup>1</sup> 马 孜<sup>3</sup> 王三强<sup>4</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>重庆理工大学电子信息与自动化学院, 重庆 400054

<sup>3</sup>西南技术物理研究所, 四川 成都 610000

<sup>4</sup>国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123

**摘要** 介绍了宽波段成像光谱仪系统中一种工作波段为 0.35~1.7  $\mu\text{m}$  的消偏振分色片的设计与研制。根据成像光谱仪的工作特点,利用分色片将近紫外、可见波段和近红外波段光谱进行高效分离,分别进入各自焦面,并被不同探测器接收。选择两种光学薄膜材料,利用四个反射堆实现了近紫外到可见光波段的高效反射;通过调整反射堆的次序,解决了近紫外波段材料吸收造成的偏振灵敏度高的难题;通过非规整膜层的匹配平滑了透射波段的光谱。分色片反射波段和透射波段的光学效率分别达到了 97% 和 91% 以上,反射波段的偏振灵敏度控制在 1.5% 以内。

**关键词** 薄膜; 宽波段; 成像光谱仪; 分色片; 偏振灵敏度

**中图分类号** TB43 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1131001

## Design and Fabrication of a Depolarizing Dichroic Beam Splitter Working in Band from Near-UV to Near-Infrared

Zhuang Qiuhui<sup>1,2</sup> Liu Guojun<sup>1</sup> Fu Xiuhua<sup>1</sup> Ma Zi<sup>3</sup> Wang Sanqiang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup> College of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

<sup>3</sup> Xinan Technology Physical Research Institute, Chengdu, Sichuan 610000, China

<sup>4</sup> Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China

**Abstract** A depolarizing dichroic beam splitter, which works in the waveband from 350 nm to 1700 nm is designed and fabricated for broadband imaging spectrometers. Based on the working characteristics of the imaging spectrometer, the spectra in near-UV, visible and near-infrared bands are effectively separated, and the signals spread to their respective focal planes and are received by different detectors, respectively. In order to achieve high reflectance from near-UV to visible, two thin film materials are selected to structure four reflectance stacks. The linear polarization sensitivity is hard to control because of absorption of the thin film materials, and the problem is solved by adjusting the order of stacks. The spectra in the transmission band are smoothed by the non-regular film matching. The optical efficiencies in the reflection and transmission bands are as high as 97% and 91%, respectively, and the linear polarization sensitivity is lower than 1.5%.

**Key words** thin films; broad band; imaging spectrometer; dichroic beam splitter; polarization sensitivity

**OCIS codes** 310.5448; 120.6200; 120.4820

## 1 引 言

随着成像光谱遥感应用技术的研究和发展,对光谱仪的光谱覆盖范围、工作波段以及分辨率要求越来越

收稿日期: 2016-05-18; 收到修改稿日期: 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(51275551,51505053)、重庆市教委科学技术研究项目(KJ1600934)

作者简介: 庄秋慧(1979—),女,硕士,讲师,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: zqh@cqut.edu.cn

通信联系人: E-mail: gjliu626@126.com

高,且遥感仪器的技术指标要求也越来越全面和严格<sup>[1-2]</sup>。对于光谱覆盖范围较宽的光学仪器,一种探测器难以覆盖光谱仪的整个工作波段,需要对光谱信息按波段进行分割,分别进入各自后光路并被对应探测器接收<sup>[3]</sup>。偏振灵敏度是遥感光学仪器诸多指标中的一个重要指标,近些年受到了国内外研究机构的广泛关注和深入研究<sup>[4]</sup>。被探测目标的辐射光偏振状态在多数情况下是一种干扰信息<sup>[5]</sup>。偏振灵敏度是仪器本身固有的特性,会对探测精度造成很大影响,进而影响对被测目标的反演精度。在大多数情况下,仪器偏振灵敏度对遥感信息的影响是有害的,因此仪器的偏振灵敏度应尽可能小。

在多通道光学遥感仪器中,通常采用分光元件来实现不同波段光信号的分离。常用的分光元件包括色散棱镜、衍射光栅、法布里-珀罗(F-P)标准具、分色片等<sup>[6]</sup>。色散棱镜的色散能力与棱镜体积和材料密切相关,对体积和重量都有严格要求的光学遥感仪器很少采用这种分光方式;衍射光栅和 F-P 标准具都能够实现小体积和轻量化,但无法实现仪器偏振灵敏度的调制;分色片作为一种多层薄膜元件,利用光的干涉原理实现不同波段光谱信息的高效分离,还可以对仪器的偏振灵敏度进行调制,是对偏振灵敏度要求较高的光学遥感仪器中常用的分光元件<sup>[7-8]</sup>。本文介绍了宽波段成像光谱仪系统中一种工作波段为  $0.35\sim 1.7\ \mu\text{m}$  的消偏振分色片的设计与研制。

## 2 分色片工作原理与膜系设计

### 2.1 分色片工作原理与技术要求

工作波段覆盖近紫外到短波红外波段( $350\sim 1700\ \text{nm}$ )的光谱仪的系统光路如图 1 所示,被测目标光信号经卡塞格林望远系统两次反射后进入后光路,在后光路设置一个与系统光轴成  $45^\circ$  角的分色片,反射  $350\sim 750\ \text{nm}$  波段的光谱信息,透射  $900\sim 1700\ \text{nm}$  波段的光谱信息。为了消除仪器偏振灵敏度对探测精度的影响,要求系统可见光波段偏振灵敏度控制在  $2\%$  以内。

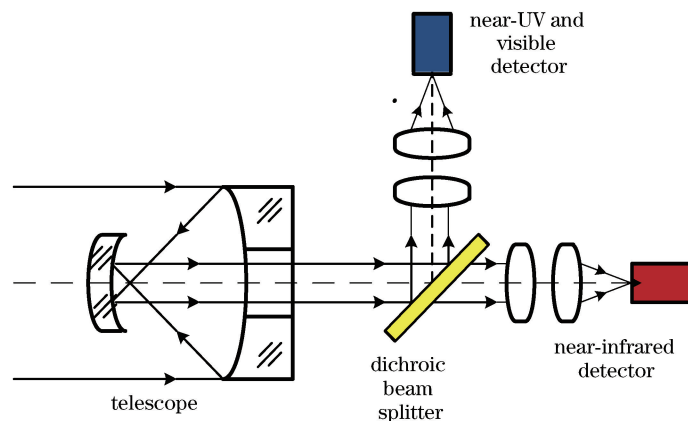


图 1 光谱仪的系统光路

Fig. 1 Optical path of the spectrometer

根据光学系统能量传递和偏振灵敏度的要求,分色片具体指标如下:分色片工作角度为  $45^\circ$ ;  $350\sim 750\ \text{nm}$  波段光谱反射,反射率  $R\geq 95\%$ ;  $900\sim 1700\ \text{nm}$  波段光谱透射,透射率  $T\geq 90\%$ ;  $350\sim 750\ \text{nm}$  波段线偏振灵敏度(LPS)小于等于  $1.5\%$ 。

### 2.2 薄膜材料的选择

光学薄膜元件的工作波段是薄膜材料选择的重要依据。适当的光学薄膜材料制备工艺是保证良好薄膜性能的关键因素。从薄膜沉积前的膜料状态、基片清洗工艺、沉积方法选择,到薄膜沉积过程中各种工艺参数如沉积速率、衬底温度、背景气体压强等,都对薄膜性能有重要的影响<sup>[9]</sup>。在可见光到短波红外波段,常用作低折射膜料的低吸收介质薄膜材料包括有限的几种氧化物和氟化物材料( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgF}_2$ ),常用作高折射膜料的低吸收介质薄膜材料主要为几种氧化物材料( $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{HfO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$ )。

对于短波反射长波透射结构的分色片,通常采用高低折射率材料配对的介质反射堆来实现光谱分离。

对于反射带较宽的分色片,需要利用多个反射堆的叠加来实现宽带反射。对于高低折射率材料确定的反射堆来说,其反射带宽表达式为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right), \quad (1)$$

式中  $n_H$  为高折射率,  $n_L$  为低折射率。从(1)式不难看出,高反射带的带宽只与构成反射堆的高低折射率材料的折射率比值相关,折射率的比值越大,高反射带越宽。为了使用更少的反射堆覆盖更宽的反射带,应尽可能选择折射率差值大的高低折射率材料匹配<sup>[10]</sup>。

薄膜材料的透明区也是材料选择的一个重要衡量指标,吸收较大降低反射或透射的光学效率,偏振灵敏度也较难控制,因此尽可能选择工作波段在其透明区的光学薄膜材料。常用的低折射率材料在近紫外到短波红外波段均有较好的透光特性,无明显吸收;高折射率材料在近紫外波段则呈现出不同程度的吸收。选择三种常用的高折射率氧化物材料制备单层膜样品,对比光谱曲线(图2)不难看出,  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  材料的折射率依次降低,同时在靠近紫外波段的吸收也依次减小。

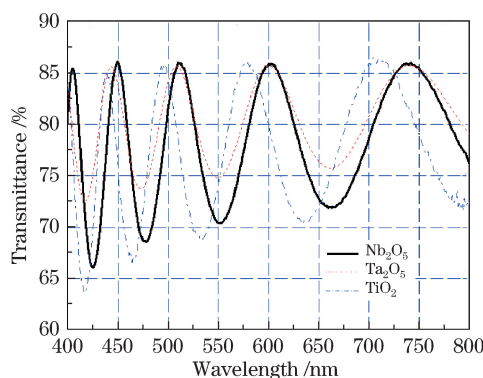


图2 三种常用高折射率材料单层膜测试光谱

Fig. 2 Spectra of single-layer films made of three commonly used high refractive index materials

综合考虑材料折射率、应力匹配、理化特性等因素,选择  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  分别作为高、低折射率材料(分别用 H 和 L 表示),进行分色片的设计与制备。

### 2.3 分色片膜系设计

当光束倾斜入射时,P 偏振光的高、低折射率膜料的折射率之比为  $n_H \cos \alpha_L / n_L \cos \alpha_H$ , S 偏振光的高、低折射率膜料的折射率之比为  $n_H \cos \alpha_H / n_L \cos \alpha_L$ ,其中  $\alpha_H$  和  $\alpha_L$  分别为高折射率材料和低折射率材料的偏振光入射角。S 偏振光的高、低折射率之比比 P 偏振光大,根据反射膜的截止带宽公式,可知 S 偏振光的反射带宽比 P 偏振光宽。

可通过两种方法获得较宽的反射带:1)设计合适的不同中心波长的高反射膜堆并进行组合,以拓宽反射带的宽度;2)设计膜层厚度按几何级数或算术级数递变的膜系,构成一个中心波长不断变化的膜系,以得到宽的反射带。前者相对于后者方法简单,故采用第一种方法设计膜系结构。

当采用双反射膜堆叠加作为膜系主结构时,透射带内会出现较大波纹,这是由基本膜系与周围介质之间的导纳失配造成的。最有效的消除通带波纹的方法是在基本膜堆和入射介质之间以及膜堆和基底之间加匹配膜层。另外,当双反射膜堆叠加时,如果每个多层膜都由奇数层构成,并且最外层的折射率相同,则叠加之后在展宽了的高反射带的中心将会出现透射率峰值。这个峰值的出现,是因为两个多层膜的作用,类似于 F-P 干涉仪中的反射板。为避免截止带内透射峰的出现,有必要在双反射膜堆之间添加膜层作为平滑层。

对于反射短波透射长波类型的分色片,  $(0.5H L 0.5H)^x$  基本结构的周期性多层膜是常用的设计方案。由于反射波段较宽,单一的反射堆显然无法满足带宽要求,需要采用中心波长不同的反射堆叠加来实现宽波段的反射。选择中心波长  $\lambda_0 = 410 \text{ nm}$ ,按照中心波长从短到长的次序依次排列 4 个反射堆,具体初始膜系结构如下:

$$(0.5H 1L 0.5H)^{10} (0.62H 1.24L 0.62H)^9 (0.76H 1.52L 0.76H)^{10} (0.965H 1.93L 0.965H)^{10},$$

得到的光谱曲线如图 3 所示。由图可知,由于  $Ta_2O_5$  材料在近紫外区域存在一定吸收,且光信号进入波长最短的反射堆经过了较长的光程,加上材料本身散射等多方面原因,因而分色片在靠近紫外波段反射率难以提高,而且偏振灵敏度也较难控制。

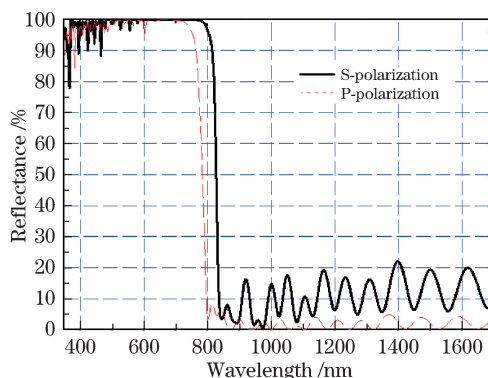


图 3 常规反射堆排列的分色片反射光谱

Fig. 3 Reflectance spectra of dichroic beam splitter in normal order stacks

分析造成近紫外波段反射能量低和偏振灵敏度难以控制的原因后,尝试调整了 4 个反射堆位置,具体膜系如下:

$$(0.965H\ 1.93L\ 0.965H)^{10}(0.76H\ 1.52L\ 0.76H)^{10}(0.62H\ 1.24L\ 0.62H)^9(0.5H\ 1L\ 0.5H)^{10},$$

得到的分色片反射光谱如图 4 所示。由图可知,虽然分色片在可见光波段的反射能量略有波动,但近紫外波段反射率得到明显改善,偏振灵敏度也控制在较低的水平。以此作为初始膜系,通过添加多层非规整膜层,对分色片透射波段的光谱进行优化,具体膜系如下:

$$(0.965H\ 1.93L\ 0.965H)^{10}(0.76H\ 1.52L\ 0.76H)^{10}(0.62H\ 1.24L\ 0.62H)^9(0.5H\ 1L\ 0.5H)^{10}\ 0.675H\ 3.64L,$$

得到的透射光谱曲线如图 5 所示,分色片在透射波段和反射波段的能量都保持在 96% 以上。根据反射波段 S 偏振和 P 偏振能量,计算得到分色片在反射波段的偏振灵敏度如图 6 所示,其平均偏振灵敏度优于 1%,最大值约为 2%。

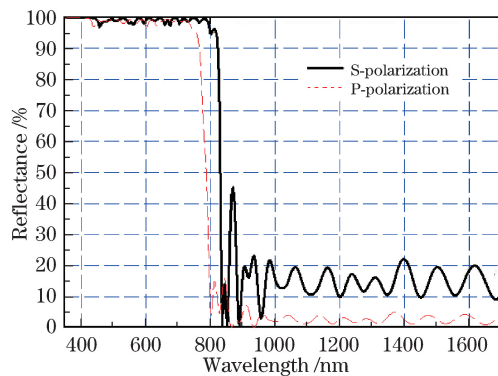


图 4 反射堆倒序排列的分色片反射光谱

Fig. 4 Reflectance spectra of dichroic beam splitter in reverse order stacks

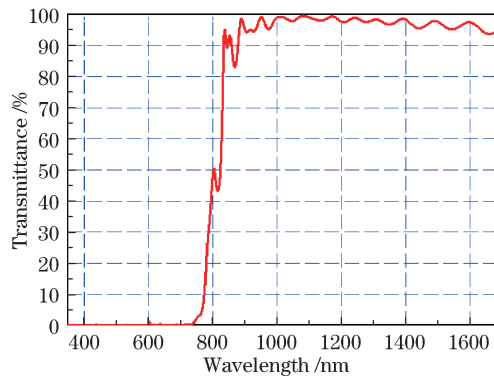


图 5 透射带平滑优化后分色片设计光谱

Fig. 5 Transmittance spectrum of the dichroic beam splitter after optimization

### 3 消偏振分色片的研制

#### 3.1 薄膜沉积系统介绍

分色片多层膜沉积在 SYRUSpro1110 型真空镀膜设备(Leybold 公司,德国)上完成。该设备真空系统选用机械泵、罗茨泵、低温冷凝泵配置。薄膜沉积系统包括两把电子枪,均选用环形旋转坩埚蒸发源,离子辅助采用 APSpro 离子辅助系统。膜层厚度监控装置由 4 位可切换探头石英晶体振荡控制器和 OMS5100 原位光学监控系统构成。设备工件盘采用帽状设计,可在真空室尺寸确定的前提下尽可能提高产能。工件的

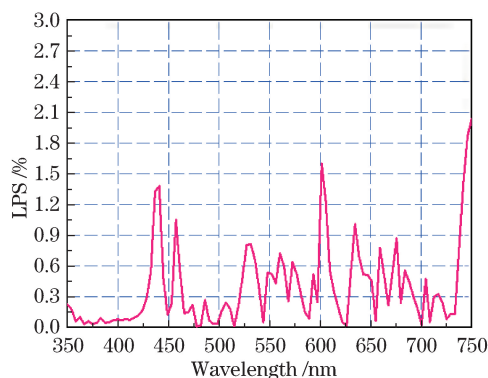


图 6 分色片反射波段偏振灵敏度设计曲线

Fig. 6 Designed LPS of reflection waveband for dichroic beam splitter

加热通过安装在帽形工件盘侧下方的两块红外加热板完成。

### 3.2 消偏振分色片制备工艺

分色片采用口径为  $\Phi 30$  mm、厚度为 5 mm 的 JGS-1 石英作为基片,并用与之形状搭配的机械夹具固定于工件盘上。真空度达到  $3 \times 10^{-3}$  Pa 时工件转动,并对基片进行烘烤,烘烤温度为  $200$   $^{\circ}\text{C}$ ,保温 1 h。

分色片制备前 10 min,向离子源充入 20 mL/min 氧气,真空室真空度保持在  $0.015 \sim 0.025$  Pa,打开 APSpro 离子源。 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  材料的蒸发速率分别控制在  $0.3$  nm/s 和  $1.0$  nm/s。按照分色片膜系设计,依次完成各膜层沉积。

## 4 消偏振分色片的测试与分析

### 4.1 分色片光谱测试

样品的透射率光谱曲线由 Lambda950 光谱测试仪(Perkin Elmer 公司,美国)获得,该设备光谱测量精度为  $\pm 0.03\%$ ,波长分辨率为  $0.1$  nm,测量范围为  $175 \sim 3300$  nm。

对于透射波段的测量,根据分色片的工作实际情况,设定测试角度为  $45^{\circ}$ ,扫描基线背景后进行样品测试,测试结果如图 7 所示。

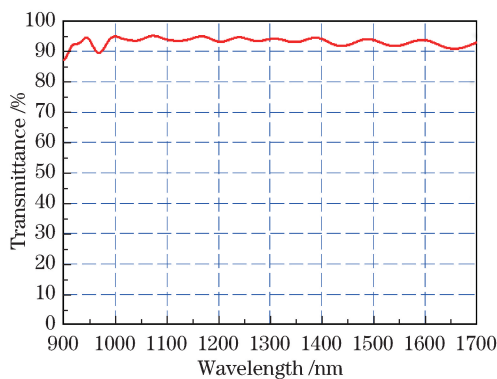


图 7 分色片透射光谱测试曲线

Fig. 7 Transmission spectrum of dichroic beam splitter

反射光谱测量需要借助反射附件来实现,为了达到高的测试精度,选择 V-W 型反射光路附件来实现反射率的直接测量。测量光线两次经过被测样品,因此直接测得的结果为  $R^2$ ,通过开方运算可得被测样品的反射率数值。分色片的反射率测试光谱如图 8 所示。从反射光谱测试结果可知,分色片在整个反射波段的反射率均在  $96\%$  以上,平均反射率优于  $97\%$ 。

### 4.2 分色片偏振灵敏度的测试与分析

根据偏振灵敏度的定义,只要获取 S 光和 P 光的能量,即可计算得到偏振灵敏度。本文通过测试 S 光和 P 光的反射光谱计算得出分色片偏振灵敏度。测量仪器仍使用上节所述光谱仪,在反射光谱测试的

基础上,在测试光路中放置起偏器,通过旋转起偏器的角度,分别获取 S 偏振分量和 P 偏振分量的反射光谱,如图 9 所示。

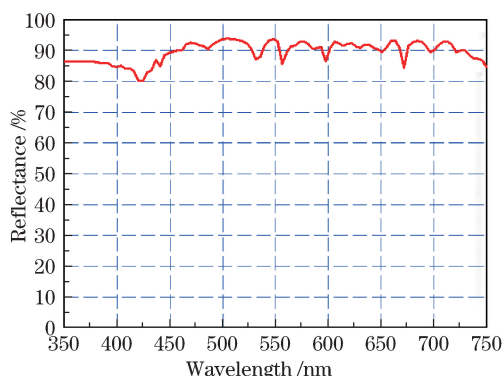


图 8 分色片反射率实测光谱曲线  
Fig. 8 Measured reflectance spectrum of dichroic beam splitter

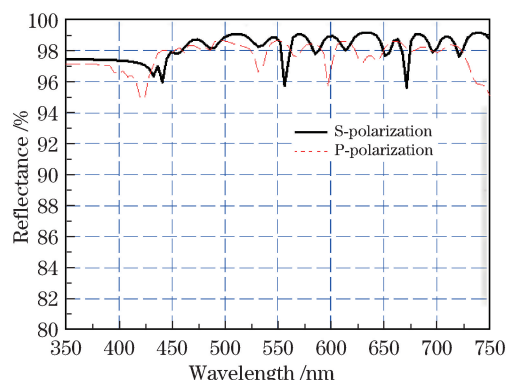


图 9 分色片 S 偏振分量和 P 偏振分量反射率测试光谱  
Fig. 9 Reflectance spectra of S-polarization and P-polarization of dichroic beam splitter

图 10 所示为分色片偏振灵敏度的测试结果,分色片在整个反射波段的平均偏振灵敏度控制在 0.44%,最大偏振灵敏度位于 750 nm 附近,最大值为 1.88%,实现了较好的反射波段偏振灵敏度控制,达到任务要求的 1.5%偏振灵敏度控制目标。

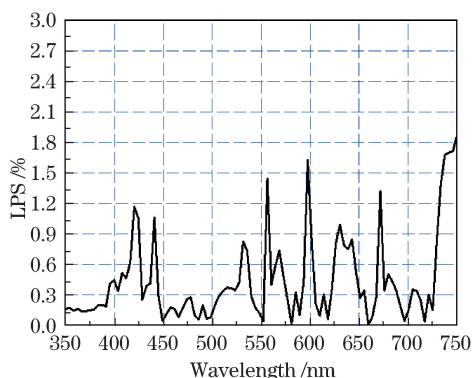


图 10 分色片反射波段偏振灵敏度测试曲线  
Fig. 10 Measured LPS of reflection waveband for dichroic beam splitter

## 5 结 论

根据宽光谱遥感光学仪器后光路波段分配的需要,选择两种光学薄膜材料,利用 4 个反射堆设计短波反射长波透射结构的分色片,实现 350~750 nm 和 900~1700 nm 两个波段光谱的高效分离。通过反射堆的倒序排列,解决了近紫外波段因薄膜材料吸收和散射造成其反射率和偏振灵敏度难以控制的难题,并利用多层非规整结构对分色片透射波段光谱进行了平滑优化。分色片实测结果表明,其反射波段的光学效率达到 97%,偏振灵敏度优于 1%,透射波段在背面未增透的情况下透射率达到 91% 以上,增透后透射率预计在 93% 以上。该分色片的研制为低偏振灵敏度宽光谱遥感仪器提供了高效的分色解决方案。

## 参 考 文 献

- Xue Qingsheng. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for space-based atmospheric remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822005.  
薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822005.
- Guo Banghui, Wang Jian, Huang Jianbo, *et al.* Design of tripleband optical imaging system and analysis of ghost image [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 0111003.

- 郭帮辉, 王 健, 黄剑波, 等. 三波段光学成像系统设计及鬼像分析[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0111003.
- 3 He Yinghong, Ma Zhen, Zhao Baochang, *et al.* Optical system design of space sensor with two long focal length lens[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3027-3033.
- 贺应红, 马 臻, 赵葆常, 等. 实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3027-3033.
- 4 Rowlands N, Neville R A, Powell I P. Short-wave infrared (SWIR) imaging spectrometer for remote sensing[C]. SPIE, 1994, 2269: 237-247.
- 5 Johnson W R, Wilson D W, Bearman G. All-reflective snapshot hyperspectral imager for ultraviolet and infrared applications[J]. Optics Letters, 2005, 30(12): 1464-1466.
- 6 Zhang Yueguang, Wang Ying, Sun Xuezheng, *et al.* Design and fabrication of short-wave/long-wave infrared dichroic beam splitter[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 597-601.
- 章岳光, 王 颖, 孙雪铮, 等. 红外短波/长波分色片的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 597-601.
- 7 Yin Xin, Liu Dingquan, Duan Weibo, *et al.* Design and fabrication of near-infrared dichroic beam-splitter for polarization state coding[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2012, 31(6): 505-509.
- 尹 欣, 刘定权, 段微波, 等. 近红外波段偏振编码用分色片的设计与研制[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(6): 505-509.
- 8 Zhuang Qiuhui, Fu Xiuhua, Liu Guojun. Design and fabrication of a near-infrared dichroic beam splitter used for space laser communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0831002.
- 庄秋慧, 付秀华, 刘国军. 用于空间激光通信系统的近红外分色片设计与研制[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0831002.
- 9 Zhong Disheng. Vacuum deposition[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001: 42-48.
- 钟迪生. 真空镀膜[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001: 42-48.
- 10 Macleod H A. Thin-film optical filters[M]. Tucson: CRC Press, 1999: 179-208.